

DOI: 10.11779/CJGE2021S2008

高饱和土固液气热耦合分析模型及验证

王路君^{1,2}, 王 鹏^{*1}, 朱 斌^{1,2}, 叶智刚¹, 徐文杰^{1,2}, 陈云敏^{1,2}

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学超重力研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘 要: 我国沿海地区及河湖区域广泛分布高饱和土, 其内部封闭游离气泡对温度和压力变化敏感, 土骨架、孔隙水、游离气泡间易发生复杂固液气热耦合作用, 显著改变土体压缩和渗流特性。基于 OpenGeoSys 有限元平台, 对饱和土多场耦合控制方程进行维度扩充, 使其应用范围扩展至高饱和土; 引入气体质量守恒方程, 嵌入 Clapeyron 和 Kelvin-Laplace 等方程实现气体状态表征和液气两相流运移过程描述; 建立了高饱和土固液气热耦合分析模型, 丰富了 OpenGeoSys 平台二次开发基准代码库。通过已有试验和数值结果验证了模型正确性, 并进一步探索了高饱和土固液气热耦合时变行为。分析表明, 高饱和土封闭气泡的存在显著改变土体固结进程; 温压环境改变时, 土中孔压初期消散占优, 随着热量传递、温度作用增强, 孔压由消散转为累积并达峰值; 温度上升加速气体扩散, 温度越高孔压消散速率增幅越大。

关键词: 高饱和土; 固液气热耦合; OpenGeoSys; 温度

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)S2-0032-04

作者简介: 王路君(1985—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为土体多场耦合和海洋岩土工程。E-mail: lujunwang@zju.edu.cn。

Thermo-hydro-mechanical coupling analysis model for unsaturated soils with high degree of saturation and its verification

WANG Lu-jun^{1,2}, WANG Peng¹, ZHU Bin^{1,2}, YE Zhi-gang¹, XU Wen-jie^{1,2}, CHEN Yun-min^{1,2}

(1. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering of the Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Center for Hypergravity Experimental and Interdisciplinary Research, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Unsaturated soils with high saturation (USHS) are widely distributed around the coastal areas and rivers / lakes in China, whose internal free bubbles are sensitive to temperature and pressure, causing complex thermo-hydro-mechanical (THM) coupling responses and subsequent changes of soil compression and seepage characteristics. Based on the FEM platform OpenGeoSys, the governing equations for saturated soils are expanded to be applied for USHS by introducing the gas mass equation. The Clapeyron, Kelvin-Laplace and other equations are embedded, and a THM coupling model for USHS is established, thus enriching the processes and functions of OpenGeoSys. Verification cases are carried out by comparing with the experimental and numerical results, and then the coupling behaviors of USHS are further explored. It is revealed that the consolidation process of soils can be significantly affected by closed bubbles. When temperature and pressure change, the pressure dissipation dominates initially, whereas accumulates and reaches the peak with heat transfer and enhancement. The gas diffusion can be accelerated by temperature rise, meaning greater pressure dissipation rate accompanied by higher temperature.

Key words: unsaturated soil with high degree of saturation; thermo-hydro-mechanical coupling; OpenGeoSys; temperature

0 引 言

我国沿海地区和河湖区域土层在有机沉积物生化分解或无机热解作用下会产生一定气体形成高饱和土。其气体主要赋存形式有: 溶解于孔隙水、形成游离气泡和生成化合物^[1]。游离气泡的存在使土体处于特殊的亚稳态结构, 力学特性显著改变; 环境温度改变时, 封闭游离气收缩或膨胀, 溶解于水的气体往往溶解或脱溶, 以化合物赋存的气体也可能分解^[2], 改变游离气含量。外力或温度环境改变时, 土体内孔隙水、孔隙气和固相骨架间产生复杂的固液气热耦合作

用, 影响其压缩性、渗透性和强度, 是高温管道、地热开发等能源设施建设和运行的重要科学问题^[2-4]。

目前高饱和土的固液气相互作用研究相对成熟, 已建立了一些考虑孔隙结构变化和水力特性的固液气耦合模型^[5-6]。针对高温管道、地热开发利用等领域遇到的土体固液气热耦合作用问题, 一些学者借助

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52078458); 国家自然科学基金基础科学中心项目(51988101); 浙江省自然科学基金探索项目(LY21E080026); 浙江省自然科学基金重大项目(LCD19E090001)。

收稿日期: 2021-08-13

***通信作者** (E-mail: 12012041@zju.edu.cn)

COMSOL、CODE_BRIGHT 等商业软件, 对温变时土体的特性进行了探索^[7]。目前商业软件已建立相对丰富的模型库, 但其核心程序存在技术保护, 可扩展性受限且存在供应商锁定等问题。为研究高饱和土在力和温度荷载共同作用下的多场耦合问题, 本文基于多场多相开源程序 OpenGeoSys (OGS)^[8], 采用 C++ 语言对原有饱和土多场耦合控制方程进行维度扩充, 增加气体质量守恒方程, 引入 Clapeyron、Kelvin-Laplace 等方程实现气体状态的表征及液气两相流的描述, 最终建立高饱和土固液气热耦合分析模型。

1 控制方程

考虑多孔介质液气二相渗流、气体扩散、温度传递、骨架变形等过程, 本文基于如下假设: 系统固相质量不变; 液、气渗流遵循 Darcy 定律; 气体扩散遵循 Fick 定律; 固相颗粒不可压缩; 热量传递包括热传导和热对流; 水蒸发和冷凝过程中焓值为零。建立水、气质量守恒方程, 能量守恒方程, 动量平衡方程, 并与位移、水压力、气压力、温度四个主变量关联。

1.1 质量守恒方程

考虑热膨胀的固相质量守恒方程为

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -(1-n)\beta_s \frac{\partial T}{\partial t} + (1-n)\text{div} \bar{v}^s \quad (1)$$

考虑源汇项 q^w , 孔隙水质量守恒方程为^[9]

$$\frac{\partial}{\partial t}(nS_w \rho^w + nS_g \rho^{gw}) + \text{div} J_g^{gw} + \text{div}(nS_g \rho^{gw} \bar{v}^{gs}) + \text{div}(nS_w \rho^w \bar{v}^{ws}) + (S_w \rho^w + S_g \rho^{gw}) \text{div} \bar{v}^s = q^w \quad (2)$$

考虑源汇项 q^a , 干燥气体质量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(nS_g \rho^{ga}) + \text{div} J_g^{ga} + \text{div}(nS_g \rho^{ga} \bar{v}^{gs}) + nS_g \rho^{ga} \text{div} \bar{v}^s = q^a \quad (3)$$

式中 n 为孔隙率; ρ 表示密度; \bar{v}^s 表示固相骨架运动速度; β_s 为固相热膨胀系数; S_w , S_g 分别表示液、气饱和度; $\text{div} J_g$ 表示扩散通量; \bar{v}^{gs} 表示气体相对流速。

1.2 能量守恒方程

考虑源汇项 q^E , 能量守恒方程可表示为^[10]

$$\begin{aligned} & [(1-n)\rho^s C_p^s + nS_w \rho^w C_p^w + nS_g \rho^g C_p^g] \frac{\partial T}{\partial t} + \\ & (nS_w \rho^w C_p^w + nS_g \rho^g C_p^g) \text{grad} T - \\ & \text{div}[\chi_{\text{eff}} \text{grad} T] = q^E \end{aligned} \quad (4)$$

式中 C_p 为热容; T 表示温度; \bar{v}^w , \bar{v}^g 分别表示液、气渗流速度; 导热系数 $\chi_{\text{eff}} = (1-n)\chi^s + nS_w \chi^w + nS_g \chi^g$ 。

1.3 动量平衡方程

动量平衡方程为^[9]

$$\nabla \sigma + [(1-n)\rho^s + nS_w \rho^w + nS_g \rho^g]g = 0 \quad (5)$$

总应力 σ 和有效应力 σ' ^[10]如下:

$$\sigma = \sigma' - m^T (S_w p^w + S_g p^g) \quad (6)$$

$$d\sigma' = D_e (d\varepsilon - d\varepsilon^T) \quad (7)$$

式中 g 为重力加速度; $m^T = [1, 1, 0, 0, 0]^T$; p^w , p^g 分别为孔隙水、气压力; D_e 为弹性本构张量; $d\varepsilon^T$, $d\varepsilon$ 分别表示温度及总应变张量。

1.4 辅助方程

气体压力由 Clapeyron 方程、Dalton 定律描述:

$$p^{ga} = \frac{\rho^{ga} RT}{M_a}, p^{gw} = \frac{\rho^{gw} RT}{M_w}; p^g = p^{ga} + p^{gw} \quad (8)$$

液、气相渗流采用 Darcy 定律描述:

$$\eta^\pi \bar{v}^{\pi s} = \frac{K k^{r\pi}}{\mu^\pi} (-\text{grad} p^\pi + \rho^\pi g) \quad (9)$$

气体扩散遵循 Fick 定律^[10]:

$$J_g^{ga} = -\rho^g \frac{M_a M_w}{M_g^2} D_g \text{grad} \left(\frac{p^{ga}}{p^g} \right) = -J_g^{gw} \quad (10)$$

式中 M 表示摩尔质量; 理想气体常数 $R=8.3\text{J/mol}\cdot\text{K}$; $\pi=w, g$ 分别为液相和气相; η^π 为体积分数; K 为固有渗透率; $k^{r\pi}$ 为相对渗透系数, μ^π 为黏滞系数; D_g 为有效扩散张量。

采用 Kelvin-Laplace 方程描述蒸气压变化^[3, 9]:

$$p^{wg} = p^{\text{sat}} \exp \left(-\frac{p^c M_w}{\rho^w RT} \right) \quad (11)$$

土水特征曲线采用 VG 模型^[3, 9]:

$$S_{\text{eff}} = \frac{S_w - S_r}{1 - S_r} = \left[\frac{1}{(\alpha p^c)^{n_c} + 1} \right]^{m_c} \quad (12)$$

相对渗透特性模型可表示为

$$k^{rw} = \sqrt{S_{\text{eff}}} [1 - (1 - S_{\text{eff}})^{\frac{1}{n_1}}]^{n_1} \quad (13a)$$

$$k^{rg} = (1 - S_{\text{eff}})^{\frac{1}{3}} (1 - S_{\text{eff}})^{\frac{1}{n_g}} \quad (13b)$$

式中 p^c 为毛细吸力; p^{sat} 为饱和蒸气压; S_{eff} 为等效饱和度; S_r 为残余水饱和度; α 为常量; m_c , n_c 为土体性质相关的常数; n_1 , n_g 为孔隙形态相关常数。

2 模型开发及验证

2.1 模型开发及求解思路

为求解上述方程, 本文在开源有限元平台 OGS-6 上开发高饱和土固液气热耦合分析模型。OGS 是用于多孔介质热水力化多场耦合模拟的专业软件, 便于二次开发, 目前主流版本有 OGS-5 和 OGS-6。OGS-5 中控制方程组离散矩阵集成于单个文件, 二次开发时代码间相互影响, 对初学者存在一定难度。OGS-6 实现了代码的模块化存储, 具有更强的扩展性, 并优化算法提高了计算效率。目前 OGS-6 官方版本主要面向饱和和多孔介质, 仅有 Richards 流和 MoMaS 模型两个非饱和土模型。其中 Richards 流模型假定气压恒等于大气压, 难以描述气封闭工况; MoMaS 模型未考虑

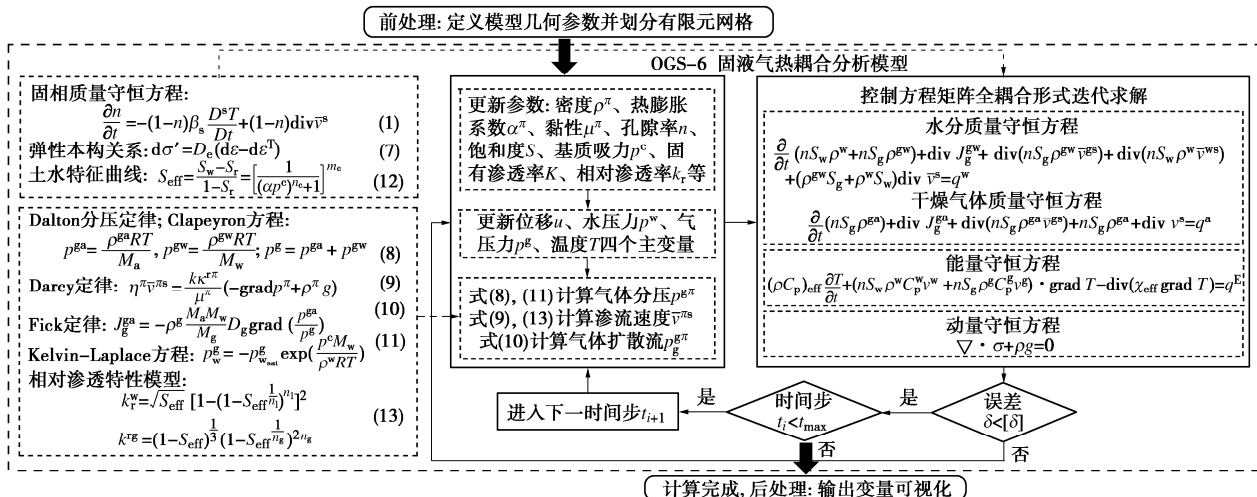


图1 模型计算流程 Fig. 1 Calculation process of model

气体扩散, 且仅考虑恒温工况。

本文模型开发过程中考虑气相影响, 对原有控制方程进行维度扩展, 引入气体质量守恒方程; 通过 Clapeyron 方程、Dalton 分压定律和理想气体方程解决计算过程中气相状态难以描述的问题; 引入 Kelvin-Laplace 方程实现液气相变过程模拟; 基于 VG 土水特征曲线建立饱和度-水压力-气压力耦合关系, 用相对渗透模型和 Fick 定律反映气相渗流和扩散。引入边界条件和形函数离散控制方程(2)~(5), 将各控制方程写为弱积分形式(14)。模型计算流程如图1。

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_{wu} & M_{ww} & M_{wg} & M_{wT} \\ M_{gu} & M_{gw} & M_{gg} & M_{gT} \\ 0 & 0 & 0 & M_{TT} \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \bar{u} \\ \bar{p}^w \\ \bar{p}^g \\ \bar{T} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{uu} & K_{uw} & K_{ug} & K_{uT} \\ 0 & K_{ww} & K_{wg} & K_{wT} \\ 0 & K_{gw} & K_{gg} & K_{gT} \\ 0 & K_{Tw} & K_{Tg} & K_{TT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{u} \\ \bar{p}^w \\ \bar{p}^g \\ \bar{T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f^u \\ f^w \\ f^g \\ f^T \end{bmatrix} \quad (14)$$

2.2 与 Nageswaran^[11]试验对比

将本文与 Nageswaran^[11]软土固结试验对比。参照实验选取参数值, 土孔隙率 $n=0.63$, 饱和度 $S_w=0.8$, 0.9, 泊松比 $\nu=0.3$, 杨氏模量 $E=1.69$ MPa; VG 模型 $n_c=1.5$, $\alpha=0.08$, $S_r=0.08$, 其他参数见表1。模型直径 0.1m、高 0.04 m, 顶部固支不排水, 两侧简支不排水。模型在 100 kPa 下固结并施加 100 kPa 荷载, 上边界孔隙水压力变化与固结试验^[11]对比见图2, 一致性较好。

2.3 与已有数值结果对比

将计算结果与 Schrefler 等^[12]数值结果对比。参数依据文献[12]选取, $n=0.5$, $S_w=0.445$, $\nu=0.4$, $E=6$ MPa; 土水特征曲线采用 BC 模型, $n_c=0.38$, 进气值 $p_0=200$ kPa, 其他参数见表2。一维模型高 0.1 m, 底部固支

绝热不排水, 两侧简支绝热不排水, 顶部自由。初始温度 283.15K, 顶部温度荷载 $\Delta T=15$ K。由图3知本模型与文献[12]结果吻合较好。Schrefler 等^[12]模型中假定气体密度仅与热膨胀相关, 未考虑气体扩散效应, 对高饱和土液气相压力计算可能存在较大误差。

表1 模型计算参数取值^[11]Table 1 Parameters for consolidation case^[11]

参数	固相	液相	气相
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2710	1000	Clapeyron 方程(8)
热容 $C_p/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	1000	4200	2100
热传导系数 χ	1.5	0.6	0.03
热膨胀系数 $\beta/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	1.5×10^{-5}	2.1×10^{-4}	Clapeyron 方程(8)
黏滞系数 $\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	—	1.0×10^{-3}	7.0×10^{-6}
渗透特性常数 n_1, n_2	—	2	3.5

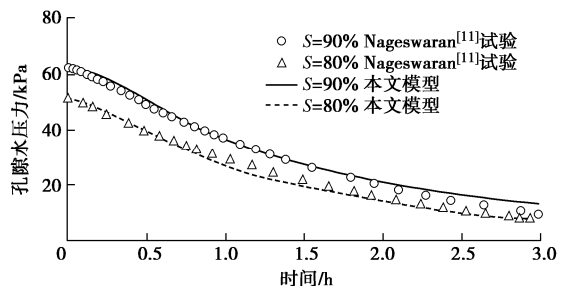


图2 孔隙水压力随时间变化对比

Fig. 2 Comparison of pore water pressures over time

表2 模型计算参数取值^[12]Table 2 Parameters for non-isothermal case^[12]

参数	固相	液相	气相
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2000	1000	Clapeyron 方程(8)
热容 $C_p/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	1000	4200	1000
热传导系数 χ	0.02	0.02	0.02
热膨胀系数 $\beta/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	3.0×10^{-7}	6.3×10^{-6}	Clapeyron 方程(8)
黏滞系数 $\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	—	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-6}
渗透特性常数 n_1, n_2	—	3	3

3 高饱和土固液气热耦合响应

本节基于 2.2 节案例, 在模型底部分别施加 15K、30K 的温度荷载及 100 kPa 的外力, 研究其在力和温

度荷载共同作用下的耦合响应。图 4 描述了饱和度为

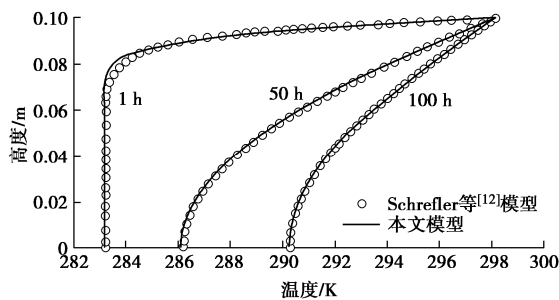


图 3 热传递过程中模型温度变化对比

Fig. 3 Comparison of temperature changes during heat transfer 80%、90%时超孔隙水压力随时间的变化过程。升温引起的热膨胀及水分蒸发, 会在孔隙中产生额外超孔压, $\Delta T=30\text{K}$ 时该值达 10 kPa。初期以排水固结为主, 孔隙水压力有小幅消散; 随着温度作用加强, 孔隙水压力逐渐累积并达峰值。升温初期产生较大的超孔隙水压力, 但其消散速率反而更快, 主因是升温加速了气体扩散。将 Fick 定律中压力梯度项展开如式 (15), 温度上升后气体扩散通量更大, 导致气相对超孔压消散的阻滞作用减小。

$$\nabla \left(\frac{p^{\text{gw}}}{p^{\text{g}}} \right) = \left(\frac{\nabla p^{\text{g}} - \nabla p^{\text{w}}}{p^{\text{g}}} \right) \frac{\partial p^{\text{gw}}}{\partial p^{\text{c}}} + \frac{\partial p^{\text{gw}}}{\partial T} p^{\text{g}} \nabla T - \frac{p^{\text{gw}}}{(p^{\text{g}})^2} \nabla p^{\text{g}} \quad (15)$$

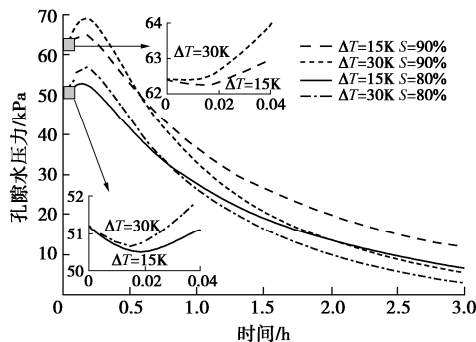


图 4 超孔隙水压力随时间发展变化

Fig. 4 Variation of excess pore water pressure with time

4 结 论

本文针对能源设施与高饱和土地基相互作用问题, 基于 OGS 有限元平台, 开发了高饱和土固液气热耦合分析模型, 扩充了 OGS 平台二次开发基准代码库及其应用范围。通过与已有试验和数值结果验证了模型的正确性, 进一步探索了力和温度荷载共同作用下高饱和土固液气热耦合时变行为。

参考文献:

[1] SILLS G C, WHEELER S J. The significance of gas for offshore operations[J]. Continental Shelf Research, 1992, 12(10): 1239 - 1250.

[2] BRIAUD J L, CHAOUCH A. Hydrate melting in soil around hot conductor[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(7): 645 - 653.

[3] ZHU B, YE Z G, WANG L J, et al. Hydro-mechanical behavior of unsaturated soil surrounding a heated pipeline considering moisture evaporation and condensation[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 119: 103377.

[4] 李 萍, 杜 军, 刘乐军, 等. 我国近海海底浅层气分布特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(1): 69 - 74. (LI Ping, DU Jun, LIU Le-jun, et al. Distribution characteristics of the shallow gas in Chinese offshore seabed[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(1): 69 - 74. (in Chinese))

[5] 魏海云, 詹良通, 陈云敏. 高饱和度土的压缩和固结特性及其应用[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 264 - 269. (WEI Hai-yun, ZHAN Liang-tong, CHEN Yun-min. Compressibility and consolidation of unsaturated soils with high degree of saturation and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 264 - 269. (in Chinese))

[6] XU Y R, LEUNG C F, YU J, et al. Numerical modelling of hydro-mechanical behaviour of ground settlement due to rising water table in loess[J]. Natural Hazards, 2018, 94(1): 241 - 260.

[7] JACINTO A C, VILLAR M V, GÓMEZ-ESPINA R, et al. Adaptation of the van Genuchten expression to the effects of temperature and density for compacted bentonites[J]. Applied Clay Science, 2009, 42(3/4): 575 - 582.

[8] KOLDITZ O, BAUER S, BILKE L, et al. OpenGeoSys: an open-source initiative for numerical simulation of thermo-hydro-mechanical/chemical (THM/C) processes in porous media[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 67(2): 589 - 599.

[9] WANG X R, SHAO H, WANG W Q, et al. Numerical modeling of heating and hydration experiments on bentonite pellets[J]. Engineering Geology, 2015, 198: 94 - 106.

[10] LEWIS R W, SCHREFLER B A. The finite element method in the static and dynamic deformation and consolidation of porous media[M]. Wiley: Chichester, 1998: 50 - 53.

[11] NAGESWARAN S. Effect of gas bubbles on the sea bed behavior[D]. Oxford: The University of Oxford, 1983.

[12] SCHREFLER B A, ZHAN X Y, SIMONI L. A coupled model for water flow, airflow and heat flow in deformable porous media[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 1995, 5(6): 531 - 547.